

ESCENARIOS DE TEMPERATURAS EXTREMAS EN MEXICALI, MÉXICO BAJO CONDICIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO

O. Rafael GARCÍA CUETO, Néstor SANTILLÁN SOTO,
Sara OJEDA BENÍTEZ, Margarito QUINTERO NÚÑEZ
Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California
**rafaelcueto@uabc.edu.mx, nsantillan@gmail.com, sara.ojeda.benitez@gmail.com,
maquinu@gmail.com**

RESUMEN

Los eventos climáticos extremos pueden tener severas consecuencias en la población y el medio ambiente. En este artículo se realiza un análisis y modelación de las temperaturas extremas, máximas y mínimas, y se estiman los períodos de retorno, de 5 a 100 años, para la ciudad de Mexicali, México. Se aplicó la Distribución Generalizada de Valores Extremos (DGVE) a la aproximación de máximo por bloques, y la Distribución Generalizada de Pareto (DGP) a valores sobre un umbral determinado previamente. Debido a la no-estacionaridad de la serie de valores de temperatura, se incluyó la tendencia temporal como covariable en el parámetro de ubicación observándose mejoras sustanciales, sobre todo con la temperatura mínima extrema, en comparación con lo obtenido con la DGVE sin covariable y con la DGP.

Palabras clave: Distribución Generalizada de Valores Extremos, Distribución Generalizada de Pareto, Temperatura Máxima, Temperatura Mínima, Mexicali México.

ABSTRACT

Climate extreme events can have serious consequences in population and environment. In this paper an analysis and modeling of extreme temperatures, maximum and minimum, is realized, and return periods, of 5 to 100 years, for Mexicali, Mexico are estimated. Generalized Extreme Value (GEV) Distribution is applied to block maxima approach and Generalized Pareto Distribution (GPD) to values above peaks over threshold. Due to values non-stationary of temperature, its temporal trend is included as covariable in location parameter, suggesting that there is a significant improvement of the models, above all with minimum temperature, compared with the results of GEV and GPD.

Key words: Generalized Extreme Value Distribution, Generalized Pareto Distribution, Maximum Temperature, Minimum Temperature, Mexicali Mexico.

1. INTRODUCCIÓN

Diversos estudios indican que se pueden esperar cambios en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos (ECE), como las ondas de calor, sequías e inundaciones, en diversas regiones del mundo en respuesta al cambio climático global (IPCC, 2007). Los cambios en esos eventos extremos son particularmente importantes para la sociedad y el medio ambiente, ya que por definición ocurren

fuera del rango de adaptabilidad habitual, y por tanto pueden producir severos impactos y un incremento significativo de pérdidas económicas (Kharin *et al.*, 2007). De particular importancia son las variaciones en las temperaturas extremas por su relación con la biodiversidad, el confort térmico humano, y por su utilización en las evaluaciones de impactos de variabilidad y cambio climático en sectores como la agricultura y demanda de energía. En el período de 1906 a 2005 la tendencia de la temperatura media terrestre se estimó en $0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.18^{\circ}\text{C}$, y aunque es un valor pequeño, debido a este incremento se tuvieron afectaciones perceptibles en muchos sistemas físicos y biológicos (IPCC, 2007). Episodios de calor y frío extremo asociados con el incremento de mortalidad podrían acentuarse en este siglo de acuerdo a algunas proyecciones realizadas (Curriero *et al.*, 2002; Qian y Lin 2004).

Estudios relacionados con el análisis y modelación de ECE tienen como herramientas esenciales para su estudio a los Modelos de Circulación General (MCG) y la Teoría de Valores Extremos (TVE). En particular, la TVE modela el comportamiento de las observaciones extremas, máximas o mínimas. Su aplicación a estudios climáticos es reciente (Naveau *et al.*, 2005), pero cada vez son más los estudios que usan la TVE en eventos relacionados con el tiempo atmosférico y el clima, y sus impactos en la sociedad humana y ecosistemas (Dixon *et al.*, 2005; Katz *et al.*, 2005; Unkašević y Tošić, 2009; Furió y Meneu, 2011; Constantino, 2011; García-Cueto y Santillán, 2012).

México es un país vulnerable ante el fenómeno de cambio climático, sin embargo los impactos no serán uniformes. El IPCC (2007) ha mostrado que la parte norte de México y el sur de Estados Unidos serán regiones donde el déficit de agua será exacerbado debido a incrementos en la temperatura y reducción en la precipitación. De acuerdo a los escenarios climáticos nacionales, los incrementos mayores de temperatura media anual serán en el norte del país, y aún más en el noroeste que en el noreste (Magaña *et al.*, 2012). Los incrementos para el período 2070-2099 serán del orden de 3.5°C en el noroeste, y alrededor de 3°C en el noreste, bajo el escenario A2. Tejeda-Martínez *et al.* (2008) estimaron incrementos en el mes de julio para la temperatura máxima extrema, los valores varían de 0.5°C en los 2020s, a 9°C en los 2050s; y de 0.5°C en los 2020s, a 7°C en los 2050s para la temperatura mínima extrema; los incrementos dependen del desarrollo socioeconómico y de la zona del país.

Estudios de temperaturas extremas en la República Mexicana, incluyen entre otros a Englehart y Douglas (2005), y Pavía *et al.*, (2008) quienes mostraron que en las últimas décadas del siglo XX (post-1970) se presentó un incremento en las temperaturas máximas a un ritmo significativamente mayor que las temperaturas mínimas, con tendencias contrastantes entre el noroeste y centro de México, respecto al resto del país. Análisis regionales como el de Herrera (2011) para el estado de Nuevo León, Vázquez-Aguirre *et al.*, (2008) para el estado de Veracruz, y Peralta-Hernández *et al.*, (2009) para el sur de México, encontraron tendencia creciente significativa en la temperatura máxima y frecuencia de días cálidos. Para la ciudad de Mexicali, en el estado de Baja California, se realizó una modelación de las ondas cálidas por la vulnerabilidad creciente e impactos en la morbilidad y mortalidad (García Cueto *et al.*, 2010). Respecto a las temperaturas mínimas Weiss y Overpeck (2005) reportan un aumento en el período libre de heladas en parte del desierto de Sonora, aunque también hay tendencias negativas hacia el extremo sureste del mismo desierto. Solamente el estudio de Ríos-Alejandro (2011) aplicó la TVE para modelar las temperaturas mínimas de invierno en la ciudad de Monterrey, N.L., mediante la distribución Gumbel. El análisis anterior confirma que los estudios realizados a nivel regional se han enfocado en estudiar las *tendencias* de temperaturas extremas. La evidencia de los cambios observados depende de la región considerada, el método de análisis y el período disponible de datos.

Es claro que con una tendencia poblacional cada vez más citadina, tanto los seres humanos, como la infraestructura y ecosistemas urbanos, incrementarán su vulnerabilidad debido a los escasos estudios prospectivos de ECE. Así que el propósito de este artículo es aplicar la TVE a la temperatura máxima y temperatura mínima de Mexicali, México, y estimar valores de retorno en periodos de 5 a 100 años, bajo la premisa de que el clima esperado en este siglo XXI es no-estacionario, como resultado del forzante antropogénico, ya sea por un incremento del efecto invernadero, o cambio de albedo por el cambio de uso del suelo. Este estudio es importante dada la vulnerabilidad mostrada en múltiples ocasiones ante eventos extremos de temperatura en esta ciudad. La construcción de esos escenarios será de gran importancia como insumo para los investigadores de impactos y para el gobierno local, con el propósito de proponer medidas de adaptación que aumenten la resiliencia.

2. DATOS

La ciudad de Mexicali se ubica en el estado de Baja California, México, en la latitud 32.55°N, longitud 115.47°W y 4 msnm. Los datos diarios de temperatura máxima y mínima, de 1950 al 2010, se obtuvieron de la base digitalizada ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica, V2.0) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, y se completaron con los registros históricos locales de la Comisión Nacional del Agua. Se seleccionaron dos periodos de análisis: de verano, definido de Junio a Septiembre, y de invierno, de Noviembre a Febrero. Para este estudio se tomaron en cuenta: a) valores extremos anuales de temperatura, máximos y mínimos, y b) valores máximos y mínimos diarios del periodo seleccionado. La primera elección conduce a aplicar la técnica estadística de máximo por bloques, y la segunda la de valores sobre un umbral. Previo a la aplicación de la TVE se realizó un análisis temporal (figura 1a), en la que se observa una tendencia creciente de la temperatura máxima extrema de verano, estadísticamente significativa al 95%. También, las temperaturas mínimas extremas de invierno se han incrementado (figura 1b) de manera significativa (99%), que parecen estar asociadas al crecimiento urbano y por el cambio local de uso del suelo en las inmediaciones del lugar de medición.

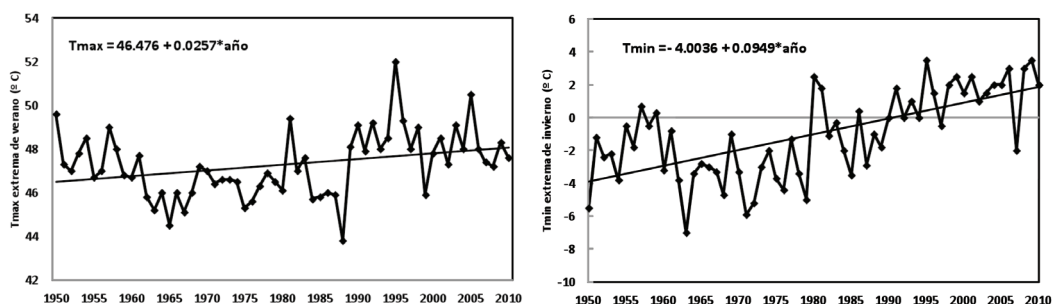


FIG. 1: Tendencias de la temperatura máxima extrema de verano (izquierda) y temperatura mínima extrema de invierno (derecha) en Mexicali, México, durante el periodo 1950-2010.

3. METODOLOGÍA

Se utilizaron dos aproximaciones alternativas para analizar estadísticamente los valores extremos: *máximo de bloques anuales* y *valores diarios por encima de un umbral*.

3.1. La Distribución Generalizada de Valores Extremos (DGVE)

Sea X_1, \dots, X_n una secuencia de variables aleatorias independientes con una función de distribución común F , y sea $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$. Las X_i usualmente representan valores máximos (o mínimos) medidos en una escala regular de tiempo, ó *bloques de tiempo*, así que M_n representa los valores extremos del proceso en n unidades de tiempo de observación. Para esos datos, y mediante una renormalización lineal, las distribuciones de M_n están dadas por la familia Generalizada de Valores Extremos en la forma:

$$(1) \quad Gz; \mu, \sigma, \xi = \exp[-1 + \xi z - \mu \sigma + -1/\xi]$$

Donde $(-\infty < \mu < \infty)$, $\sigma > 0$ y $(-\infty < \xi < \infty)$ son los parámetros de ubicación, escala y forma, respectivamente, y $x_+ = \max(x, 0)$. Los tipos extremos de distribución se determinan por el signo de ξ ; si $\xi < 0$ se tiene la distribución Weibull, si $\xi = 0$ la distribución Gumbel, y si $\xi > 0$ la distribución Fréchet. El valor de ξ determina el comportamiento de la cola de la distribución. Si $\xi < 0$ se tendrá una distribución con un límite superior definido, mientras que si $\xi > 0$ corresponderá a una cola superior cada vez más grande.

3.2. La Distribución Generalizada de Pareto (DGP)

Debido a que la aproximación dada por la ecuación 1 solamente toma los valores máximos o mínimos de una serie de tiempo, se infiere que hace caso omiso de muchos datos. En contraste, la aproximación de *valores sobre un umbral* (POT, por sus siglas en inglés) analiza las excedencias de ese valor umbral, y los datos que estén por encima de ese valor pueden ser asintóticamente aproximados por la Distribución Generalizada de Pareto:

$$(2) \quad Gx; \sigma, \xi, u = 1 - 1 + \xi x - u/\sigma - 1/\xi$$

Donde $x - u > 0$, $1 + \xi(x - u)/\sigma > 0$ y $\sigma = \sigma + \xi(u - \mu)$. Esta función da la probabilidad acumulativa de que X exceda el valor de x , dado que ya supera el valor umbral de u (es decir, $\Pr[X > x | X > u]$). La dualidad entre las familias DGVE y DGP significa que el parámetro de forma ξ es dominante y común en la determinación del comportamiento cualitativo de ambas distribuciones. Además, el valor de σ , se encuentra que es dependiente del valor umbral, excepto en el caso donde el modelo tiene el valor límite de $\xi = 0$. La selección del valor umbral es crítico al análisis de la aproximación POT. Un umbral muy grande descartaría demasiados datos, conduciendo a una alta varianza del estimador, y un umbral muy pequeño es probable que viole la base asintótica del modelo, conduciendo a sesgo. En este artículo se utilizaron las técnicas de función de exceso medio como punto de partida, y evaluación de la estabilidad de los estimadores de los parámetros para la selección del valor umbral, basado en el ajuste de la DGP mediante la postulación de un rango de diferentes umbrales u .

3.3. Estimación de Parámetros

Para la estimación de parámetros se eligió el de máxima verosimilitud, fundamentalmente porque: a) la muestra de datos es suficientemente grande (> 50) así que es comparable en rendimiento con otros métodos; b) permite incorporar fácilmente información de covariables (distribuciones no-estacionarias p.e.), y c) es más sencillo obtener los límites de error comparados con la mayoría de los métodos alternativos. La ecuación 1 asume que los datos son máximos o mínimos de bloques anuales. La estimación de μ , σ y ξ se realiza usando la función de máxima verosimilitud para máximos independientes de bloques z_1, \dots, z_n como:

$$(3) \quad L\mu, \sigma, \xi = i = 1 \text{kd}G(z_i; \mu, \sigma, \xi) dz_i$$

3.4. Estimación de Niveles de Retorno (Cuantiles) y Gráficas de Diagnóstico

El *nivel de retorno*, z_p , de un evento extremo se define como el nivel que se espera sea excedido en promedio una vez cada $1/p$ años (llamado *período de retorno*); p es la probabilidad de ocurrencia del evento extremo. Para la DGVE dada en (1), z_p se obtiene de:

$$(4) \quad z_p = \mu - \sigma \xi \& 1 - y_p - \xi, \text{ for } \xi \neq 0 \mu - \sigma \log y_p, \text{ for } \xi = 0$$

Donde $y_p = -\log(1-p)$. Por el método delta, $\text{var } z_p \approx \nabla z_p T V z_p$, en la que V es la matriz de varianza-covarianza de los parámetros estimados (μ, σ, ξ) $\nabla z_p T = \partial z_p / \partial \mu, \partial z_p / \partial \sigma, \partial z_p / \partial \xi = 1, -\xi - 1, 1 - y_p - \xi, \sigma \xi - 2(1 - y_p - \xi) - \sigma \xi - 1 - y_p - \xi \log y_p$. Si z_p se grafica versus y_p , la gráfica llamada de *nivel de retorno* es lineal si $\xi = 0$; si $\xi < 0$ es convexa con un límite asintótico conforme $p \rightarrow 0$ en $\mu - \sigma/\xi$; si $\xi > 0$ es cóncava y no tiene un límite finito. Esta gráfica es particularmente útil para la presentación y validación del modelo. Otras gráficas de diagnóstico son la *de probabilidad* y la *de cuantiles* que se determinan a partir de (1). Para completar el diagnóstico se realiza una comparación de la función de densidad de probabilidad con la DGVE del histograma de los datos.

El nivel de retorno para la DGP se forma con el lugar geométrico de puntos (m, x_m) para valores grandes de m , en donde x_m es el *nivel de retorno* estimado de la m -observación:

$$(5) \quad x_m = u + \sigma \xi (m \zeta u) \xi - 1, \text{ si } \xi \neq 0$$

Aquí u es el valor umbral seleccionado, $\zeta_u = \Pr(X > u) = k/n$, k se refiere al número de excedencias y n es el número de observaciones. Al igual que con la DGVE, para la DGP también se usan las mismas gráficas de diagnóstico. La modelación se realizó usando el software libre R y el paquete extremes que está diseñado para usarse en los problemas de eventos extremos de tiempo y clima (Gilleland y Katz, 2005).

4. RESULTADOS

4.1. Aplicación de la DGVE a las temperaturas extremas anuales

Los datos de temperaturas extremas, máximas y mínimas, tomados en forma de bloques anuales, 61 en total de cada una, corresponden al período de 1950 al 2010. Para aplicar la DGVE a las temperaturas mínimas anuales se aplicó el método usual para valores máximos, pero se realizó la transformación de los datos tomando el negativo de esos valores mínimos. Es decir, $\min(x_1, \dots, x_n) = -\max(-x_1, \dots, -x_n)$.

La función de verosimilitud de la DGVE para las temperaturas máximas extremas (TMXEXT) y temperaturas mínimas extremas (TMNEXT), produjo los siguientes resultados. Para la TMXEXT los estimadores de los parámetros (μ, σ, ξ) = (46.69, 1.39, -0.161), con errores estándar de 0.19, 0.13 y 0.07, respectivamente. Combinando estimadores y errores estándar, los intervalos de confianza (IC) al 95% para la TMXEXT son (46.31, 47.07) para μ , (1.13, 1.66) para σ , y (-0.024, -0.298) para ξ . Para la TMNEXT, los estimadores (μ, σ, ξ) = (0.13, 2.53, -0.27), con errores estándar de 0.36, 0.27 y 0.1, respectivamente. Para la TMNEXT, los IC al 95% son (0.49, 0.29) para μ , (2.80, 2.26) para σ , y (-0.37, -0.17) para ξ . El parámetro de forma (ξ) es negativo en los dos casos de temperaturas extremas, por lo que la distribución Weibull ajusta bien a este conjunto de datos. Ambas temperaturas extremas tienen un límite superior, por lo que hay valores finitos que no pueden ser excedidos. Las gráficas de diagnóstico para evaluar la precisión de la DGVE ajustada a la TMXEXT y TMNEXT se muestran en las figuras 2a y 2b, respectivamente.

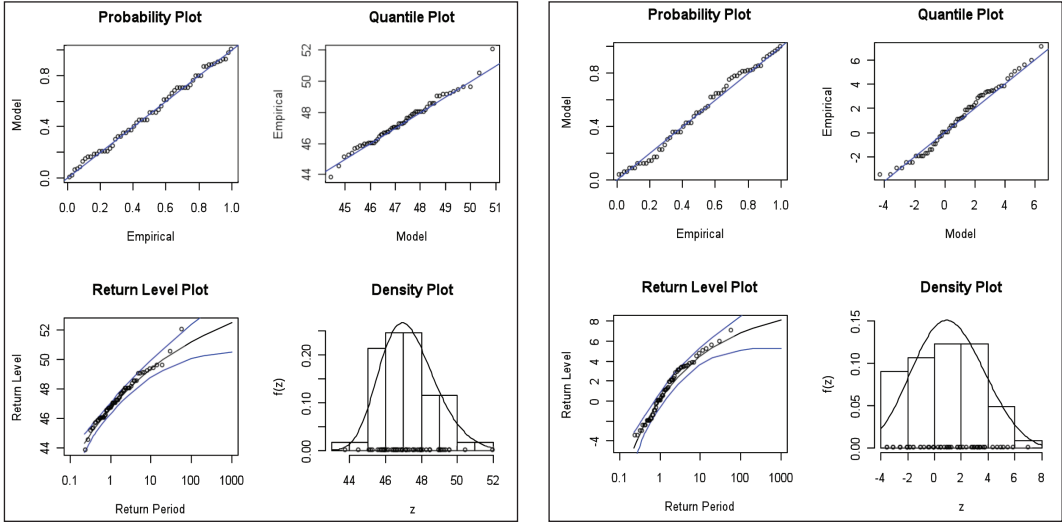


FIG. 2: Gráficas de diagnóstico de la DGVE a la TMXEXT (izquierda) y TMNEXT (derecha) en Mexicali, México (1950-2010).

Las gráficas de probabilidad y de cuantiles muestran la validez del modelo propuesto: cada conjunto de puntos sigue una conducta casi-lineal. Las curvas de niveles de retorno, como consecuencia del estimador negativo del parámetro ξ , son no lineales. La correspondiente función de densidad parece consistente con el histograma de los datos, mucho mejor con la TMXEXT que con la TMNEXT como se aprecia en el panel derecho inferior de la figura 2b.

4.1.a. PERÍODOS DE RETORNO

Los períodos de retorno para la TMXEXT Y TMNEXT son las gráficas mostradas en el panel inferior izquierdo de las figuras 2a y 2b, junto con las bandas de confianza al 95%, estimadas por el método delta, que asume que los estimadores de los parámetros son simétricos, lo que no es siempre el caso para el parámetro de forma o períodos grandes de retorno.

Usualmente se alcanza una mayor precisión de los IC con el método de máxima verosimilitud, por lo que se aplicó ese método para estimar los períodos de retorno de 5 a 100 años y los IC. En la tabla 1 se presentan los resultados con la DGVE. Los niveles de retorno gradualmente se incrementan para períodos de retorno cada vez más grandes. También los IC se hacen crecientemente más anchos conforme el período de retorno se incrementa.

Período de retorno, años	Nivel de retorno (°C)		Límite inferior (°C)		Límite superior (°C)	
	TMXEXT	TMNEXT	TMXEXT	TMNEXT	TMXEXT	TMNEXT
5	48.5	-3.2	48.1	-2.5	49.1	-4.1
10	49.3	-4.4	48.8	-3.6	50.1	-5.5
15	49.7	-5.0	49.2	-4.1	50.6	-6.3
20	49.9	-5.3	49.4	-4.5	51.0	-7.0
25	50.2	-5.6	49.7	-4.7	51.3	-7.2

Período de retorno, años	Nivel de retorno (°C)		Límite inferior (°C)		Límite superior (°C)	
	TMXEXT	TMNEXT	TMXEXT	TMNEXT	TMXEXT	TMNEXT
50	50.7	-6.2	50.1	-5.3	52.3	-8.3
75	51.0	-6.6	50.3	-5.6	52.8	-8.9
100	51.2	-6.8	50.4	-5.8	53.2	-10.4

TABLA 1: Niveles de retorno e IC al 95% para la TMXEXT y TMNEXT con la DGVE en Mexicali, México.

4.2. Aplicación de la DGP a las temperaturas máximas diarias de verano

La DGP usa más información que el modelo DGVE que está basado solamente en bloques de valores anuales. Por esa razón la DGP se ajustó a las temperaturas máximas diarias de Mexicali (6, 600 datos del período 1950-2010). Los estimadores de máxima verosimilitud de la escala modificada (σ^*) y parámetro de forma (ξ) versus u la temperatura máxima diaria se muestra en la fig. 3. Las perturbaciones de los parámetros son pequeñas hasta el umbral elegido que fue de 46.

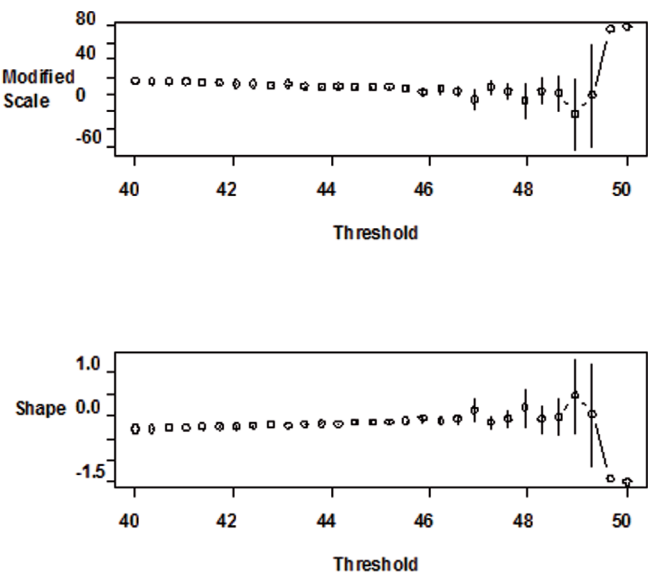


FIG. 3: Ajuste de la DGP para un rango de 30 umbrales de 40°C a 50°C. Se presenta la escala modificada (σ^*) y el parámetro de forma (ξ) versus el umbral para la temperatura máxima diaria de verano en Mexicali México durante el periodo de 1950-2010.

Los estimadores de máxima verosimilitud para las temperaturas máximas diarias son $(\sigma^*, \xi) = (1.20, -0.14)$, con errores estándar de 0.08 y 0.04, respectivamente. Los IC de esos parámetros al 95% son (1.12, 1.28) para σ^* , y (-0.10, -0.18) para ξ . Las gráficas de probabilidad y de cuantiles se muestran en la figura 4. Se observa que los datos graficados son casi-lineales. De acuerdo con los valores negativos de ξ , las colas son finitas y las curvas del nivel de retorno son no lineales. El modelo de la DGP no fue rechazado porque el estadístico de razón de verosimilitud fue mayor que la prueba de bondad de ajuste χ^2 ($7.106016 > 3.84146$). El valor p asociado a la prueba es 0.00768.

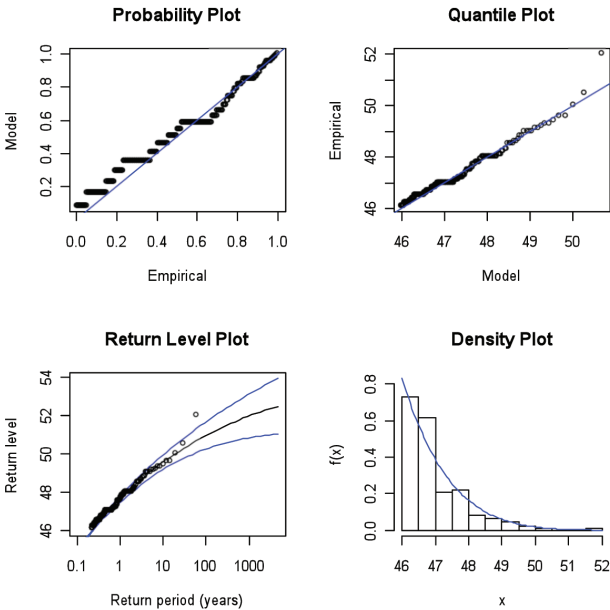


FIG. 4: Gráficas de diagnóstico de la DGP a las temperaturas máximas diarias de verano en Mexicali, México durante el periodo de 1950-2010.

4.3. Aplicación de la DGP a las temperaturas mínimas diarias de invierno

Para las temperaturas mínimas diarias de invierno se realizó también una selección del umbral (u) para el ajuste de la DGP. Las perturbaciones de los parámetros fueron pequeñas hasta el umbral elegido que fue de -1. Los estimadores son $(\sigma, \xi) = (2.18, -0.21)$, con errores estándar de 0.14 y 0.04, respectivamente. Los IC al 95% son (2.32, 2.04) para σ , y (-0.25, -0.17) para ξ . De acuerdo con los valores negativos del parámetro de forma, las colas son finitas. El modelo DGP no fue rechazado porque el estadístico de razón de verosimilitud fue mayor que la prueba de bondad de ajuste de χ^2 ($14.96237 > 3.84146$). El valor p asociado a la prueba de razón de verosimilitud es 0.000109. La tabla 2 muestra los resultados de los niveles estimados de retorno e IC del 95% para las temperaturas máximas y mínimas diarias.

Período de retorno, años	Nivel de retorno (°C)		Límite inferior (°C)		Límite superior (°C)	
10	49.5	-5.0	49.2	-4.5	50.0	-5.6
15	49.8	-5.3	49.5	-4.8	50.4	-6.1
20	50.0	-5.6	49.6	-5.0	50.6	-6.4
25	50.2	-5.7	49.8	-5.2	50.8	-6.7
50	50.6	-6.2	50.1	-5.6	51.4	-7.4
75	50.8	-6.5	50.3	-5.8	51.8	-7.8
100	50.9	-6.6	50.4	-5.9	52.0	-8.1

TABLA 2: Niveles de retorno e IC del 95% obtenidos con la DGP, para las temperaturas máximas y mínimas diarias en Mexicali, México.

4.4. Incorporación de una covariable con la TMXEXT y TMNEXT en la DGVE

Los argumentos asintóticos apoyan el uso de la DGVE para modelar la TMXEXT y TMNEXT, pero la presencia de la tendencia temporal, de acuerdo al análisis preliminar realizado (figuras 1a y 1b) plantea dudas sobre la idoneidad del modelo convencional que supone una media constante en el tiempo. La no-estacionaridad se podría explicar permitiendo que el parámetro de ubicación de la DGVE dependa del tiempo. Un parámetro adecuado para la temperatura extrema en el año t , Z_t , podría ser de la forma $Z_t \approx DGVE [\mu(t), \sigma, \xi]$, donde $\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t$. El parámetro μ_1 corresponde a la razón anual de cambio en las series de temperatura extrema. Para seleccionar el modelo más adecuado, se usó la prueba de razón de verosimilitud. Esta prueba arrojó un valor de 38.2 para la TMXEXT, y de 32.8 para la TMNEXT, que son valores superiores al nivel crítico de $\chi^2_{1,1-0.05-2}$, que es de 3.84. La inclusión de una tendencia lineal como covariable en el parámetro de ubicación () de la DGVE para la TMXEXT y TMNEXT produjo una mejoría significativa (al nivel del 5%). Específicamente, el modelo obtenido, para la TMXEXT, es: $(t) = 46.7 + 0.02567t$, donde t es el tiempo. Se observa que al incrementarse la variable t , los valores del parámetro de ubicación son cada vez más positivos indicando que los valores extremos de temperatura máxima serán más severos. Para la TMNEXT, el modelo obtenido es: $(t) = -4.0 + 0.09t$. Al incrementarse el tiempo, los valores del parámetro de ubicación son crecientes por lo que los valores extremos de temperatura mínima serán menos severos. La tabla 3 muestra para diversos horizontes de tiempo los valores estimados de TMXEXT excedidos y TMNEXT no superados, tomando como base el término constante de los modelos de regresión lineal, e IC, obtenidos con el método delta, con una probabilidad del 95%.

Horizontes de Tiempo	Nivel de retorno (°C)		Límite inferior (°C)		Límite superior (°C)	
	TMXEXT	TMNEXT	TMXEXT	TMNEXT	TMXEXT	TMNEXT
2015	46.7	5.1	46.2	4.3	47.2	5.9
2020	46.9	5.5	46.3	4.7	47.4	6.4
2025	47.0	6.0	46.3	5.1	47.6	6.9
2030	47.1	6.4	46.4	5.4	47.8	7.4
2035	47.2	6.9	46.5	5.7	48.0	8.0
2060	47.9	9.1	46.9	7.8	48.8	10.5
2085	48.5	11.4	47.4	9.8	49.6	13.0
2110	49.2	13.6	48.0	11.9	50.3	15.3

TABLA 3: Niveles estimados de TMXEXT y TMNEXT e IC al 95%, con la DGEV y una covariable en Mexicali, México (1950-2010).

5. CONCLUSIONES

Se observó a nivel anual una tendencia creciente, y estadísticamente significativa, de las TMXEXT y TMNEXT por lo que ambas series son no-estacionarias. Un calentamiento más acentuado se observó en las TMNEXT que puede asociarse a la urbanización. La DGVE y la DGP se ajustaron satisfactoriamente a ambas temperaturas extremas, sin embargo la extrapolación realizada con los períodos de retorno tiene algunas deficiencias. La inclusión de la tendencia temporal como covariable en el parámetro de ubicación produjo una mejoría significativa (al 95%) en la DGVE, sobre todo en las TMNEXT por lo que los evaluadores de impactos en diversos sectores deben usar los valores obtenidos en la tabla 3. La DGP aunque usa valores diarios no logra integrar la tendencia temporal en su modelación por lo que su uso es cuestionable en problemas de cambio climático.

REFERENCIAS

- Constantino, G. (2011). "Modeling extreme minimum air temperature series under climate change conditions". *Ciencia Rural* 41, 11: pp. 1877-1883.
- Curriero, F.C., Heiner, K.S., Samet, J.M., Zeger, S.L. and Patz, J.A. (2002). "Temperature and mortality in 11 cities of the Eastern United States". *Am. J. Epidemiol.* 156: pp. 193-203.
- Dixon, P., Ellison, A. and Gotelli, N. (2005). "Improving the precision of estimates of the frequency of rare events". *Ecology*. 86, 5: pp. 1114-1123.
- Englehart, P.J. and Douglas A. (2005). "Changing behavior in the diurnal range of surface air temperatures over Mexico". *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01701.
- Furió, D. and Meneu, V. (2011). "Analysis of extreme temperatures for four sites across Peninsular Spain". *Theor. Appl. Climatol.* 104: pp- 83-99.
- García-Cueto, O.R., Tejeda, M.A. and Jáuregui, E. (2010). "Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of Mexico: current trends and in climate change scenarios". *Int. J. Biometeorol.* 54: pp. 335-345.
- García-Cueto O.R. and Santillán-Soto N. (2012). "Modeling extreme climate events: two case studies in Mexico". In Leonard M. Druyan (ed.). *Climate Models*. Intech Publishing 350 pp.
- Gilleland, E. and Katz, R. (2005). Tutorial for the extremes toolkit: weather and climate applications of extreme value statistics, <http://www.assessment.ucar.edu/toolkit>
- Herrera, S.S. (2011). *Cambio climático y comportamiento de elementos climáticos en Nuevo León, México*. Tesis Doctoral en Ciencias Agrícolas. Facultad de Agronomía, UANL.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, UK and NY, USA, 996 pp.
- Katz, R., Brush, G. and Parlange, M. (2005). "Statistics of extremes: modeling ecological disturbances". *Ecology* 86, 5: pp. 1124-1134.
- Kharin, V., Zwiers, F., Zhang, J. and Hegerl, G. (2007). "Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations". *J. Clim.* 20: pp. 1419-1444.
- Magaña V., Zermeno D., Neri C. (2012). "Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico". *Clim. Research* 51: 171-184.
- Naveau, P., Nogaj, M., Amman, C., Yiou, P., Cooley, D. and Jomelli, V. (2005). "Statistical methods for the analysis of climate extremes". *C. R. Geoscience* 337: pp. 1013-1022.
- Pavía, E.G., Graef, F., Reyes, J. (2008). "Annual and seasonal surface air temperature trends in Mexico". *Int. J. Climatol.* 29, 9: pp. 1324-1329.
- Peralta-Hernández, A.R., Balling, Jr. R.C., Barba, L.R. (2009). "Analysis of near-surface diurnal temperature variations and trends in south Mexico". *Int. J. Climatol.* 29: pp. 205-209.
- Qian, W.H., and Lin, X. (2004). "Regional trends in recent temperature indices in China". *Clim. Res.* 27: pp. 119-134.
- Rios-Alejandro J. (2011). "Temperaturas extremas en la ciudad de Monterrey N.L. Mexico". *Rev. Chapingo* 17, 2: pp. 225-230.
- Tejeda-Martinez, A., Conde, A.C., Valencia-Treviso, L.E. (2008). "Climate change scenarios of extreme temperature and atmospheric humidity for México". *Atmósfera* 21, 4: pp. 357-372.
- Unkašević, M and Tošić, I. (2009). "Changes in extreme daily winter and summer temperatures in Belgrade". *Theor. Appl. Climatol.* 95: pp. 27-38.
- Vazquez-Aguirre, J.L., Brunet, M., y Jones, P.D. (2008). Cambios observados en los extremos climáticos de temperatura y precipitación en el estado de Veracruz, México, a partir de datos diarios. VI Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología. En: J. Sigró Rodríguez, M. Brunet India y E. Aguilar (Eds.) *Cambio climático regional y sus impactos*. Publicaciones de la AEC, Serie A, no. 6. Artyplan, Tarragona, España, 823 pp.
- Weiss, J.L. and Overpeck J.T.M. (2005). "Is the Sonoran desert losing its cool?". *Global Change Biology*, 11: 2065-2077.